28422 DUP.

IGM87RT-203-639-G
CNRC 28422

Rapport intérimaire

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'ÉPAISSEUR DU JOINT DE COLLE SUR LES ÉNERGIES DE RUPTURE ET D'ARRÊT D'UNE COLLE ÉPOXYDIQUE

par:

Jean Doyon et François G. Hamel

Août 1987

Institut de génie des matériaux
Conseil national de recherches Canada
75 boul. de Mortagne
Boucherville (Québec)
J4B 6Y4

SOMMAIRE

Ce rapport décrit les résultats d'essais de rupture d'échantillons d'aluminium collés avec une colle époxydique mono-composante. L'énergie à la rupture en mode I, G_{1c}, a été mesurée au moyen d'échantillons DCB (double cantilever beam). Les paramètres étudiés furent l'influence de l'épaisseur du joint de colle (.1 à 2.8 mm) et de la température d'essai (-60 à 100°C).

L'énergie à la rupture augmente de façon marquée en fonction de la température. Cependant, la proportion de ruptures adhésives, surtout pour les faibles épaisseurs augmente également. Les ruptures instables (stick-slip) surviennent à toutes les températures pour les ruptures cohésives mais seulement aux températures élevées (> 20°C) pour les ruptures adhésives.

L'influence de l'épaisseur est moins importante que celle de la température bien qu'un maximum autour de 2 mm ait été observé autant pour les ruptures cohésives qu'adhésives à toutes les températures.

Nous avons également observé que la valeur de l'énergie d'arrêt, G_a, dépendait fortement de l'énergie à la rupture, G_c. Dans le cas des ruptures adhésives, l'écart entre G_a et G_c est faible. Par contre, dans le cas des ruptures cohésives, la valeur de G_a est à peu près constante et faible (.1 à .5 kJ/m^2). Autrement dit, l'écart entre G_c et G_a devient très important (≈ $2kJ/m^2$) pour les valeurs élevées de G_c. Ceci se traduit par une instabilité et une fissuration brusque sur une longue distance lors des essais.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières..... i

Liste des tableaux et figures.....iii

Introduction.....1

1.0 Procédure expérimentale.....2

1.1 Préparation des échantillons.....2
1.2 Déroulement de l'essai.....3

2.0 Analyse des résultats.....3

3.0 Résultats.....5

4.0 Discussion des résultats.....7

4.1 Influence de la température.....7
    4.1.1 Énergie de rupture.....7
    4.1.2 Énergie d'arrêt.....9

4.2 Influence de l'épaisseur du joint de colle.....11
    4.2.1 Énergie de rupture.....11
    4.2.2 Énergie d'arrêt.....12

5.0 Conclusion.....13

Remerciements.....14

Références.....15

LISTE DES TABLES ET FIGURES

Tableau 1 Résultats de la colle J

Figure 1 Dimensions d'un échantillon DCB

Figure 2 Schéma du montage d'essai

Figure 3 Courbe "voltage vs temps" d'un échantillon testé avec jauges

Figure 4 Courbe "charge vs temps" d'un échantillon testé avec jauges

Figure 5 Courbe "charge vs déformation" d'un échantillon testé avec jauges

Figure 6 Effet de la température sur G_c cohésif.

Figure 7 Effet de la température sur G_c adhésif

Figure 8 Effet de la température sur G_a cohésif

Figure 9 Effet de la température sur G_a adhésif

Figure 10 Influence de l'épaisseur de colle sur G_c cohésif

Figure 11 Influence de l'épaisseur de colle sur G_c adhésif

Figure 12 Influence de l'épaisseur de colle sur G_a cohésif

figure 13 Influence de l'épaisseur de colle sur G_a adhésif

Figure 14 Différence entre énergies de rupture et d'arrêt

Figure 15 Variation de l'énergie d'arrêt en fonction de l'énergie de rupture

INTRODUCTION

Le collage des métaux est un procédé industriel en pleine expansion depuis l'arrivée des résines. Il présente certains avantages sur les autres modes d'assemblage dont l'élimination des concentrations de contraintes, une plus grande surface d'application, un diminution de poids (intéressant, particulièrement pour l'industrie aéronautique). Cependant, le comportement de la colle est influencé par des facteurs comme la température, l'humidité, le traitement de surface, le fini de surface, l'épaisseur du joint de colle, etc.

L'objectif de ce projet est d'étudier l'influence de deux de ces facteurs soit la température de l'environnement et l'épaisseur du joint de colle sur les énergies de rupture et d'arrêt d'une colle époxydique fournie par le partenaire industriel du projet afin de déterminer les conditions limites d'opération. Ce rapport fait suite à deux autres écrits antérieurement [1,2].

La procédure expérimentale est sensiblement la même que celle indiquée au chapitre 1 du rapport [1]. Les modifications apportées sont inscrites au chapitre 1 de ce rapport-ci.

Le chapitre 2 concerne l'analyse des résultats, la provenance des formules utilisées. Les résultats sont donnés au chapitre 3 et discutés au chapitre 4.

Les données recueillies lors de ces expériences ont aussi été utilisées pour trouver un facteur de correction qui tient compte de la température, de l'épaisseur de colle et de la longueur de fissure permettant de calculer avec plus de précision la longueur de fissure à partir de la compliance de l'échantillon. Les résultats de cette analyse sont inclus dans un autre rapport intitulé "Approximation d'une éprouvette CDCB et calcul d'un facteur de correction d'une éprouvette DCB" [14][1].

---

[1] Les données de ce rapport-ci ne tiennent pas compte de ce facteur de correction.

Plusieurs graphiques sont inclus à la fin du rapport. Les données sont indiquées dans le tableau I, intitulé "Colle J". Chaque courbe est approximée par une équation du deuxième degré (si possible) qui minimise l'erreur par la méthode des moindres carrés d'après le logiciel RS/1.

1.0 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

1.1 Préparation des échantillons

L'énergie de rupture G_c a été déterminée conformément à la norme ASTM D3433 [3] sauf une légère modification apportée lors de la mesure de la compliance tel que nous le verrons plus loin. Les essais ont presque tous été effectués avec des échantillons DCB (Double Cantilever Beam) dont les dimensions sont données à la figure 1. Deux essais ont été faits avec des éprouvettes CDCB linéaires, telles que décrites dans la référence [14].

Les éprouvettes en aluminium 6351-T6 sont machinées par le partenaire industriel du projet qui les soumet également à un traitement de surface approprié. La colle utilisée est de type époxydique de couleur jaune et fournie par le même partenaire.

La colle est d'abord appliquée sur une éprouvette. Des cales sont placées aux deux extrémités de l'éprouvette afin de déterminer l'épaisseur nominale du joint de colle (de 0,1 mm à 2,8 mm). L'autre éprouvette vient s'appuyer sur ces cales. Des pinces sont placées aux extrémités de l'échantillon pour maintenir les deux éprouvettes ensemble lors du mûrissement de la colle.

Les échantillons sont ensuite placés au four pour la cuisson (curing). La température doit atteindre 150°C dans les 40 premières minutes et ensuite tendre vers un plateau à 180°C pour les 40 prochaines minutes. Tous les échantillons sont placés à la même hauteur dans le four. La température est mesurée à l'aide d'un thermocouple de type K inséré à l'intérieur du joint de

colle et au milieu de l'échantillon et est contrôlée et enregistrée par un appareil de marque OMEGA modèle 660. Les échantillons sont ensuite remachinés sur les côtés afin d'éliminer les débordements de colle.

1.2 Déroulement de l'essai

Le montage utilisé est le même que celui décrit dans la référence [1] et montré à la figure 2. Chaque essai de clivage est effectué en déformation contrôlé (strain control). En quelques occasions, lorsque le déplacement dépasse l'échelle supérieure de l'extensomètre (12,5 mm), l'essai est terminé en contrôlant la course du piston (stroke control).

Deux traçeuses de courbe permettent de recueillir les données suivantes: charge vs déformation (traçeuse analogique HP-7044A), charge vs temps, course du piston vs temps, déformation vs temps (traçeuse numérique HP-7090).

Les taux de montée sont contrôlés par un générateur de rampe en respectant la procédure prescrite par la norme ASTM D3433 [3] selon laquelle la propagation doit débuter environ une minute après le début de l'application de la charge. Après chaque essai, le type de rupture (cohésive ou adhésive) ainsi que les positions des marques d'arrêt (lorsqu'elles sont visibles) sont notés.

2.0 Analyse des résultats

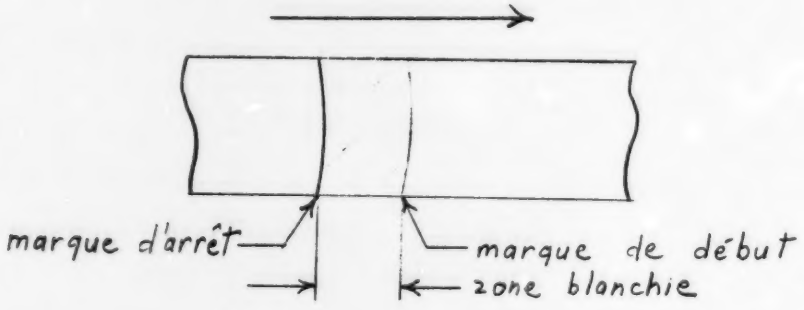
La compliance est donnée par Mostovoy et al. [4] selon la théorie des poutres:

$$C = \frac{8}{EB}\left[\frac{(a + 0.6h)^3}{h^3} + \frac{a}{h}\right] = \frac{y}{P} \qquad (1)$$

où: C = compliance de l'échantillon (mm/N)
E = module de rigidité (MPa)
B = largeur de l'échantillon (mm)

a = longueur de fissure (mm)
h = épaisseur de l'échantillon (mm)
y = déformation (mm)
P = charge (N).

Expérimentalement, la compliance est mesurée à partir de l'inverse de la pente du graphique charge-déformation. Or, la façon de tracer cette pente diffère quelque peu de la méthode suggérée par Mostovoy et al. [4]. La pente doit plutôt passer par la charge critique car la partie non-linéaire de la courbe correspond à une propagation lente qu'on peut facilement voir sur l'échantillon par une zone blanchie qui indique une microfibrillation (crazing) de la colle due à la déformation plastique.



Le début de cette zone correspond à l'arrêt de la propagtion précédente alors que la fin correspond au début de la propagation brusque. Or, au moment où la fissure commence à se propager, une partie de la déformation totale mesurée par l'extensomètre est due à la plastification en tête de fissure.

La combinaison des figures 3, 4 et 5 d'un échantillon testé avec des jauges (voir référence 1) nous permet de justifier ce changement. On remarque que la troisième jauge est située juste au début de la propagation rapide. Il s'avère que la longueur de fissure calculée est plus précise en prenant la pente de la droite passant par ce point.

Les valeurs de l'énergie à la rupture et de l'énergie d'arrêt sont

données par Mostovoy [4]:

$$G_c = \frac{4Pc^2}{EB^2}\left[\frac{3(a + 0.6h)^2}{h^3} + \frac{1}{h}\right] \quad (2)$$

$$G_a = \frac{4Pa^2}{EB^2}\left[\frac{3(a + 0.6h)^2}{h^3} + \frac{1}{h}\right] \quad (3)$$

où: G_c = énergie de rupture (KJ/m^2)
G_a = énergie d'arrêt (KJ/m^2)
Pc = charge critique (N)
Pa = charge minimale (N)

3.0 RÉSULTATS

Trois séries d'expérience ont été effectuées à l'été 87; soit les échantillons EJ35 à EJ62. De plus, les résultats de tous les autres essais (EJ1 à EJ34) ont été ajoutés au tableau 1, à moins qu'ils aient été testés dans l'eau ou que la colle ait été différente (JB ou lieu de J).

Tous les échantillons ont reçu un traitement de surface sauf les échantillons EJ60, EJ61 et EJ62 qui proviennent d'éprouvettes ayant déjà servi pour d'autres essais. Ces trois échantillons ont été nettoyés avec du Dynasolve 160 (solvant d'époxy), ensuite dégraissés au méthyl éthyl kétone (MEK), sablés avec du papier #320, puis dégraissés de nouveau.

Tous les résultats sont inscrits dans le tableau 1. Ce tableau est contenu dans le fichier COLLEJ disponible dans le logiciel RS/1. La colonne 0 identifie l'échantillon testé. Par exemple EJ35, où E indique que l'adhésif est à base d'époxy, J signifie que la colle est jaune et 35 indique le numéro de l'échantillon.

La température indiquée dans la colonne 1 est mesurée à l'aide d'un

thermocouple de type K placé dans le trou des goupilles utilisées pour bien aligner les éprouvettes lors du collage.

L'épaisseur de colle de la colonne 2 correspond à l'épaisseur des cales qui sont placées entre les éprouvettes lors du collage. Cette épaisseur est dite nominale.

Les colonnes 3 et 4 indiquent respectivement les valeurs moyennes de G_c et G_a obtenues à l'aide des équations 2 et 3. La première valeur de G_c obtenue à partir de la première pente pour chaque essai est rejetée car l'expérience montre que cette valeur diffère considérablement des autres mettant ainsi en doute sa validité.

La colonne 5 indique le type de rupture: 1 pour cohésive, lorsque la rupture survient à l'intérieur du joint de colle et 0 pour adhésive, lorsque la surface de rupture est plutôt située à l'interface de la colle et de l'adhérent. Parfois, on retrouve les deux types pour un même échantillon. Dans ce cas, les résultats sont écrits sur deux lignes distinctes (e.g. EJ43). La colonne 7 indique l'épaisseur de colle réelle mesurée après l'essai, à l'aide d'un micrometre.

Deux échantillons de type CDCB linéaire ont été testés (CEJ1, CEJ2). Cependant, dû à une erreur de machinage, la longueur de fissure n'a pu être déterminée à partir de la compliance. Dans le cas des échantillons CDCB linéaires, la formule établie pour estimer la longueur de fissure à partir de la compliance n'est pas l'équation 1 de ce rapport mais plutôt une autre équation développée dans la référence 14. Les valeurs de G_c et G_a ont plutôt été calculées à partir des marques d'arrêt et de début mesurées sur les échantillons après les essais.

L'échantillon EJ54 contient trois valeurs car lors du collage, deux cales d'épaisseur différente ont été placées à chaque extrémité entraînant une épaisseur du joint de colle variable sur la longueur de l'éprouvette.

4.0 DISCUSSION DES RÉSULTATS

4.1 Influence de la température

4.1.1 Énergie de rupture

Les figures 6 et 7 montrent l'influence de la température sur Gc pour des ruptures cohésives et adhésives et pour différentes épaisseurs (nominales) du joint de colle.

L'énergie de rupture G_c est fortement influencée par la température de l'essai. Plus la température augmente, plus la valeur de G_c est élevée surtout pour une rupture cohésive.

En augmentant la température, on diminue le module d'élasticité de l'époxy. Cependant, elle est moins fragile et la taille de la zone plastique augmente, ainsi que la contrainte maximale qu'elle peut supporter en tête de fissure. Dans ce cas, l'énergie nécessaire pour amorçer une fissure comprend l'énergie élastique emmagasinée mais aussi une énergie supplémentaire pour induire une déformation permanente.

La variation de l'énergie élastique du système en fonction de la température est faible puisque cette énergie est principalement emmagasinée par les éprouvettes dont le module d'élasticité varie peu. Toutefois, les déformations plastiques croissent entraînant une énergie de rupture plus élevée pour amorçer la fissure.

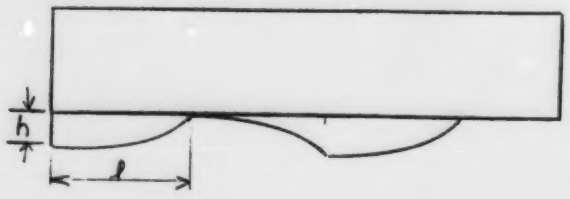
Cependant, la probabilité d'obtenir une rupture cohésive diminue avec une augmentation de température. À 80°C, aucune rupture cohésive n'a été obtenue pour des échantillons dont l'épaisseur nominale était inférieure à 2,3 mm. À haute température, la zone de plasticité en tête de fissure augmente. Si l'épaisseur de colle est trop petite, les contraintes à l'interface adhésif-adhérent imposées par les forces extérieures peuvent être supérieures aux forces des liaisons entre colle et éprouvette, même si elles ne sont pas

suffisantes pour briser les liaisons colle-colle. En conséquence, la rupture sera adhésive. La présence de l'adhérent empêche la zone plastique de se développer convenablement, diminuant la capacité d'emmagasiner de l'énergie.

L'énergie de rupture devrait donc être maximale lorsque le diamètre de la zone plastique est comparable à l'épaisseur du joint de colle, tel que proposé par Cancelli et al. [5].

À basse température, inférieure à 20°C, seulement trois ruptures adhésives ont été obtenues. La zone plastique est réduite considérablement en raison de l'augmentation de la limite d'élasticité entraînant ainsi une rupture fragile. D'ailleurs, à -30°C, tous les graphiques charge-déformation montrent un comportement "stick-slip" typique des propagations brusques. Également, les marques d'arrêt sont très difficilement visibles (parfois invisibles). Ces marques sont normalement délimitées par le début de la zone blanchie créée par la plasticité de la colle lors de la propagation suivante. Les ruptures adhésives sont probablement dues à une mauvaise préparation lors du collage, par exemple, la surface de l'éprouvette a peut-être été en contact avec une substance huileuse.

Pour les échantillons plus épais (2,3 et 2,8 mm) testés à -30°C, la surface de rupture présente un aspect particulier. La fissure se propage d'une interface à l'autre du joint de colle de façon cyclique et régulière. Le rapport entre la longueur de chaque cycle et l'épaisseur du joint de colle est d'environ 4/1. Ce phénomène a déjà été observé par Herzl Chai [6].



$\frac{h}{\ell} \simeq 4$

Il est curieux de constater que quatre essais présentent des valeurs de G_c excessivement basses (EJ1, EJ3, EJ11 et EJ13) à des températures de -20°C et moins. Ces quatres essais ont été effectués dans la même série d'expérience. Il est difficile d'expliquer ce phénomène puisque tous les autres échantillons de cette série (EJ1 à EJ15) ont des valeurs de G_c respectables. Une discussion plus élaborée est faite dans la référence [2].

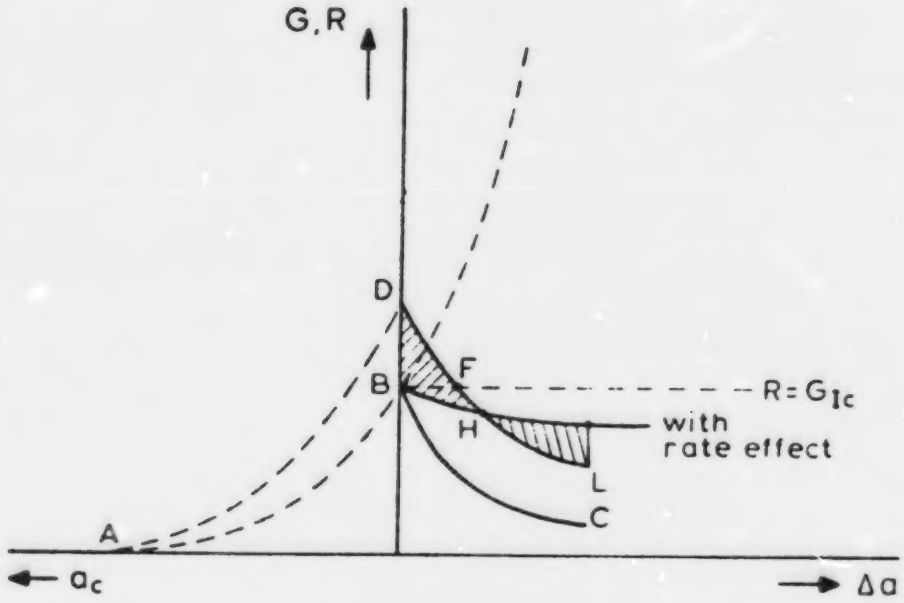
4.1.2 Énergie d'arrêt

Les figures 8 et 9 montrent l'influence de la température sur G_a pour des ruptures cohésives et adhésives et pour différentes épaisseurs de colle. Contrairement à l'énergie de rupture, l'énergie d'arrêt varie plus en fonction de la température pour une rupture adhésive que cohésive.

Pour que la fissure puisse se propager, il faut que l'énergie apportée par les forces extérieures soit suffisante pour que les liaisons atteignent leur maximum d'élasticité (énergie élastique) en plus d'une quantité due aux déformations plastiques (énergie plastique). Immédiatement après l'amorçe de la rupture, l'énergie élastique qui était emmagasinée dans le système se transforme en énergie cinétique (à 85% environ selon la référence 13) pour favoriser l'avance de la fissure alors que l'énergie plastique est perdue (irréversible).

Sur la figure suivante, si G_c est au point B, dès que la fissure commence à se propager, on tombe immédiatement sous la courbe R, l'avance de la fissure est alors infinitésimale. Pour qu'il puisse y avoir une propagation de longueur finie, l'énergie de rupture doit plutôt être au point D, ne correspond donc plus à G_c proprement dit, mais c'est quand même cette valeur qui provoque l'avance de fissure que nous avons mesurée.

La fissure se propage tant qu'il n'y a plus d'énergie cinétique. Au point H, l'énergie cinétique totale accumulée correspond à la surface BDH. La vitesse commence alors à diminuer à ce point et l'arrêt se fait lorsque les surfaces BDH et HLM sont égales.



Courbe R d'un échantillon DCB (d'après [13])

La valeur de l'énergie d'arrêt G_a (ordonnée du point L) est donc fonction de la valeur de l'énergie de rupture que nous avons atteinte lors de nos essais, mais aussi de la façon dont la courbe R varie.

La différence entre les valeurs de G_c et G_a est en général plus élevée pour une rupture cohésive (voir figure 14). Cela peut être dû, soit à la plus grande différence entre G_c mesuré et G_c réel (points D et B respectivement), soit à la forme de la courbe R qui permettrait dans les deux cas d'accumuler plus d'énergie cinétique.

Un manque d'information à ce sujet est à l'origine de l'incapacité d'expliquer correctement pourquoi les valeurs de G_a adhésif sont normalement plus élevées que celles de G_a cohésif. Une hypothèse peut cependant être émise: lorsque la rupture est adhésive, elle se propage habituellement plus lentement, ce qui aurait pour effet de faire tendre la courbe R vers

l'horizontal i.e. vers R statique. Donc, l'énergie cinétique maximum accumulée diminue, entraînant une plus haute valeur de G_a.

4.2 Influence de l'épaisseur du joint de colle

4.2.1 Énergie de rupture

Les figures 10 et 11 montrent l'influence de l'épaisseur de colle sur G_c pour des ruptures cohésives et adhésives et pour différentes températures d'essai.

Pour une rupture cohésive, G_c atteint son maximum à une épaisseur d'environ 2,0 mm à des températures de 25 et 50°C, ce qui devrait correspondre approximativement au diamètre de la zone plastique. Toutefois, à 80°C, étant donné que la taille de la zone plastique augmente, une épaisseur de 2 mm n'est pas suffisante pour lui permettre de se développer convenablement et absorber la quantité d'énergie plastique nécessaire pour atteindre le niveau où les contraintes sont supérieures aux forces des liaisons colle-colle. La rupture se fait alors au premier point où la limite est atteinte, i.e. à l'interface, même si les contraintes sont supérieures à l'intérieur du joint de colle.

On remarque aussi que pour des températures égales ou inférieures à 50°C, une trop grande épaisseur diminue la valeur de l'énergie du rupture. Même si ce phénomène a aussi été observé par quelques auteurs dont Cancelli et al. [5] et Chai [9], peu d'explications ont été données à ce sujet. Il se pourrait que l'augmentation de la probabilité de défauts contenus dans la colle (bulles d'air) soit à l'origine de ce phénomène.

À -30°C, la valeur de G_c est pratiquement indépendante de l'épaisseur de colle. À basse température, la colle est très fragile, ce qui entraîne une diminution de la taille de la zone plastique.

L'épaisseur de colle n'a donc que peu d'importance car la zone plastique

ne s'étend pas jusqu'à l'interface, ou lorsqu'elle l'atteint, les contraintes à ce niveau ne sont pas suffisantes pour briser les liaisons colle-éprouvette. Il est probable que si de plus faibles épaisseurs de colle avaient été testées, il y aurait eu des ruptures adhésives.

Expérimentalement, on remarque que la surface de rupture des échantillons présentant les meilleures valeurs de G_c adhésif sont beaucoup plus blanchies que les autres, indiquant que la déformation plastique a effectivement été plus importante.

4.2.2 Énergie d'arrêt

Les figures 12 et 13 montrent l'influence de l'épaisseur de colle sur G_a pour des ruptures cohésives et adhésives et pour différentes températures.

L'énergie d'arrêt varie de façon inverse à G_c pour une rupture cohésive avec les creux de G_a qui correspondent aux sommets de G_c. Comme nous l'avons vu plus tôt, dû au manque d'information concernant la courbe R de l'époxy, il est difficile d'apporter des explications. Cependant, on peut poser certaines hypothèses.

Plus la différence entre G_c mesuré expérimentalement et G_c réel est grande, plus l'énergie cinétique emmagasinée (surface BDH p. 10) risque d'être élevée surtout si l'on tient compte que la courbe R descend plus rapidement avec G_c expérimental élevé. Il faut donc dissiper cette énergie cinétique jusqu'à ce qu'elle soit nulle en augmentant l'incrément de la fissure et/ou diminuant la valeur de l'énergie d'arrêt.

G_a serait donc fonction de la valeur de G_c, mais aussi des propriétés de résistance à la propagation de la colle par l'entremise de la courbe R.

Pour une rupture adhésive, G_a varie de la même façon que G_c selon l'épaisseur de colle. L'écart étant presque constant entre les deux, l'avance

de la fissure à chaque incrément varie peu. Tout porte à croire que G_a dépend surtout de G_c et peu de l'épaisseur de la colle.

5.0 CONCLUSION

Plusieurs essais de rupture effectués à températures et épaisseurs de colle variables ont permis de tirer les conclusions suivantes.

Une augmentation de température (à l'intérieur de l'intervalle étudié, -60 à 80°C) améliore le rendement d'une colle époxydique pour toutes les épaisseurs. Cependant, la probabilité d'obtenir une rupture adhésive augmente aussi, surtout pour de faibles épaisseurs. À basse température, on a plutôt avantage à utiliser de faibles épaisseurs (0,1 à 1 mm) puisque la rupture est presque toujours cohésive et que l'énergie de rupture est pratiquement indépendante de l'épaisseur de colle d'où économie d'espace et de matériel.

Toutefois, à température plus élevée (80°C), la probabilité d'obtenir une rupture cohésive augmente avec l'épaisseur de colle. On a donc intérêt à choisir une épaisseur suffisante pour favoriser la rupture cohésive.

Nos essais ont démontré qu'à température de 50°C ou moins, l'épaisseur optimale se situe à environ 2 mm. À 80°C, il est difficile d'en trouver une à cause d'un manque de données.

L'influence de l'épaisseur de colle est surtout au niveau du type de rupture. Si elle est cohésive, la zone plastique a pu se développer peu importe l'épaisseur. Un excès peut toutefois diminuer la performance. Si la rupture est adhésive, son influence est plus importante, car c'est elle qui limite la grandeur de la zone plastique permise donc G_c directement.

Il convient également de rappeler que les valeurs de G_c obtenues ne correspondent pas aux valeurs réelles car peu de propagations ont été stables. Toutes les valeurs sont surestimées, on sait cependant que les

valeurs réelles de G_c ne peuvent être supérieures.

Finalement, il est important de préciser que les conclusions de ce rapport ne s'appliquent qu'à la résistance à la rupture de la colle étudiée. L'influence de la température et de l'épaisseur sur d'autres modes de chargement (cisaillement, par exemple) pourrait être différente.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient MM. René Lavallée pour sa contribution aux essais ainsi que Sylvain Caron pour sa participation aux discussions.

Références

1. Thériault, G. et Hamel F.G., "Influence des hautes et basses températures sur les joints collés à l'aide d'une colle acrylique", Rapport IGM 86-203-355, CNRC 26434 (août 1986).

2. Hamel F.G., "Influence des hautes et basses températures sur la rupture des joints collés à l'aide de colles époxydiques"., Rapport IGM 87RT-203-569G, CNRC 27579 (mai 1987).

3. Standard Practice for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Joints, ASTM Standard D3433, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.06 Adhesives, Philadelphia, Pa.

4. Mostovoy S., Crosley P.B and Ripling E.J., "Use of Crack-Line-Loaded Specimens for Measuring Plain-Strain Fracture Toughness", J. Materials, 2, No. 3, 661-681, 1967.

5. Cancelli G., Pavan A., Ricco T. and Andi Grivetta M.G., "Fracture Toughness of Modified Epoxies in Bonded Joints: Effect of Rubber Content, Strain Rate and Curing Conditions", 191-202, Looking Aheard for Materials and Processes, de Bossu G. et al, ed., Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, (1987).

6. Chai H., "A Note on Crack Trajectory in an Elastic Strip Bounded by Rigid Substrate", Int. J. Fracture, 32, 211-213, (1987).

7. Dubois P., "Plastiques modernes Tome II, Plasturgie", Masson et Cie Éditeurs, Paris, (1963).

8. Irwin G.R., "Comments on Dynamic Fracturing", Fast Fracture and Crack Arrest, ASTM STP 627, Kahn G.T. and Kanninen M.F., ed., pp. 7-18, 1977.

9. Chai H., "Bond Thickness Effect in Adhesive Joints and its Significance for Mode I Interlaminar Fracture of Composites", Composite Materials: Testing and Design, ASTM STP 893, Whitney S.M., ed., pp. 209-231.

10. Van der Hoeven W., "The Effects of Strain Rate and Temperature on the Fracture Behaviour of Three Structural Adhesives", National Aerospace Laboratory NLR, NLR TR 83099U, Amsterdam, (1983).

11. Thrall E.W. and Shannon R.W., ed., Adhesive Bonding of Aluminium Alloys, Materials Engineering, 1, Marcel Dekker, USA, (1985).

12. Palissy, Des Matériaux, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, Montréal, (1980).

13. Broeck D., Elementary Engineering Fracture Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, (1986).

14. Doyon J. et Hamel F.G., "Approximation d'une éprouvette CDCB et calcul d'un facteur de correction d'une éprouvette DCB", rapport IGM, (août 1987).

COLLEJ 60H x 8C

COLLE J

0 NUMERO D'ECHAN.	1 TEMPER. D'ESS (C)	2 EPAISS. COLLE mm	3 Gc (kJ/mA2)	4 Ga (kJ/mA2)	5 CO=1 AD=0	6 Gc - Ga (kJ/mA2)	7 EPAISS. COLLE mm	8 COMMENT
1 EJ37	-20	0.1	0.4589	0.1942	1	0.2646	0.32	
2 EJ38	24	0.1	0.3425	0.2105	0	0.0320	0.33	
3 EJ36	50	0.1	1.0075	0.5265	1	0.4810	0.34	
4 EJ36	50	0.1	0.6963	0.5836	0	0.1127	0.28	
5 EJ40	80	0.1	1.1359	0.7440	0	0.3919	0.33	
6 EJ35	24	0.4	0.7021	0.3483	1	0.4343	0.43	
7 EJ46	50	0.4	0.5686	0.4704	0	0.0982	0.45	
8 EJ42	30	2.8	0.6086	0.2923	1	0.3163	3.00	
9 EJ43	24	2.8	0.9336	0.3424	1	0.5912	2.84	
10 EJ43	24	2.8	0.4721	0.3991	0	0.0730	2.84	
11 EJ41	50	2.8	0.5397	0.4493	0	0.0904	2.95	
12 EJ45	80	2.8	1.1744	0.7308	0	0.4436	2.80	
13 EJ45	80	2.8	2.8323	1.0412	1	1.7921	2.86	
14 CEJ1	19	0.3	0.6682	0.3627	1	0.3055	0.41	F. CORR.
15 CEJ1	19	0.3	0.4127	0.3377	0	0.0750	0.41	F. CORR.
16 CEJ2	50	0.3	0.4493	0.3498	0	0.1005	0.39	F. CORR.
17 EJ5	0	0.3	0.6947	0.2120	1	0.4827	0.40	
18 EJ9	-10	0.3	0.6167	0.2311	1	0.3856	0.28	
19 EJ11	-25	0.3	0.0830	0.0598	1	0.0232	0.29	
20 EJ12	-25	0.3	0.4392	0.1780	1	0.2612	0.29	
21 EJ13	-40	0.3	0.0952	0.0712	1	0.0240	0.49	
22 EJ18	-40	0.3	0.6101	0.2357	1	0.3744	0.43	
23 EJ19	-50	0.3	0.4789	0.2128	1	0.2661	0.36	
24 EJ20	-60	0.3	0.4775	0.2519	1	0.2256	0.43	
25 EJ39	26	0.1	0.3247	0.2691	0	0.0556	0.29	
26 EJ44	50	2.8	2.0851	0.2788	1	1.8063	2.82	
27 EJ47	-30	1.0	0.5178	0.2166	1	0.3012	1.19	
28 EJ48	26	1.0	0.4721	0.4129	0	0.0592	1.11	
29 EJ49	50	1.0	0.7142	0.6265	0	0.0877	1.14	
30 EJ50	80	1.0	1.1121	0.6867	0	0.4254	1.07	
31 EJ52	-30	2.3	0.6258	0.2874	1	0.3384	2.34	
32 EJ52	-30	2.3	0.4739	0.3990	0	0.0749	2.34	
33 EJ53	26	2.3	1.0892	0.3166	1	0.7726	2.44	
34 EJ54	50	2.3	2.2762	0.2855	1	1.8607	2.82	Epaiss.
35 EJ56	80	2.3	2.6522	0.3775	1	2.2747	2.59	
36 EJ57	26	0.4	1.0409	0.2907	1	0.7502	0.53	
37 EJ58	50	0.4	1.0956	0.4172	1	0.6784	0.56	
38 EJ59	50	2.8	1.7705	0.4066	1	1.3639	2.92	
39 EJ59	50	2.8	0.8819	0.7707	0	0.1112	2.92	
40 EJ54	50	2.3	2.1531	0.2448	1	1.9083	2.73	Epaiss.
41 EJ54	50	2.3	1.9504		1		2.65	Epaiss.
42 EJ51	25	1.0	0.4297	0.3600	0	0.0697	1.24	
43 EJ55	50	2.3	1.3094	1.1186	0	0.1908	2.41	
44 EJ55	50	2.3	1.8673	0.2813	1	1.5860	2.41	
45 EJ60	25	1.5	1.0024	0.2424	1	0.7600	1.65	
46 EJ61	51	1.5	2.4810		1		1.70	
47 EJ62	80	1.5	1.6336	1.3879	0	0.2457	1.73	
48 EJ1	-20	0.3	0.0620	0.0480	1	0.0140	0.46	
49 EJ2	25	0.3	0.8320	0.1060	1	0.7260	0.33	
50 EJ3	-30	0.3	0.0790	0.0600	1	0.0190	0.30	
51 EJ4	0	0.3	0.5040	0.1960	1	0.3080	0.40	
52 EJ6	80	0.3	1.3000		0		0.27	
53 EJ7	-40	0.3	0.4120	0.1910	1	0.2210	0.35	
54 EJ8	50	0.3	2.1200	0.2020	1	1.9180	0.32	
55 EJ17	-40	0.3	0.5780	0.2330	1	0.3450	0.37	
56 EJ24	-11	0.3	0.3040		0		0.45	
57 EJ25	21	0.3	0.3730		0		0.49	
58 EJ26	49	0.3	1.2800	0.5460	1	0.7340	0.35	
59 EJ27	-25	0.3	0.4830	0.2820	1	0.2010	0.39	
60 EJ27	-25	0.3	0.2530		0		0.38	
61 EJ28	80	0.3	0.9470	0.3970	0	0.5500	0.41	
62 EJ29	-10	0.3	0.6980	0.2810	1	0.4170	0.40	
63 EJ30	19	0.3	0.9790	0.4170	1	0.5620	0.40	
64 EJ31	50	0.3	0.4970		0		0.39	
65 EJ32	100	0.3	1.7180	0.3700	0	1.3480	0.43	
66 EJ33	19	0.3	0.8780	0.4500	1	0.4280	0.32	
67 EJ33	19	0.3	0.4010		0		0.32	
68 EJ34	-42	0.3	0.5230	0.2350	1	0.2880	0.35	

Tableau 1 Résultats de la colle J

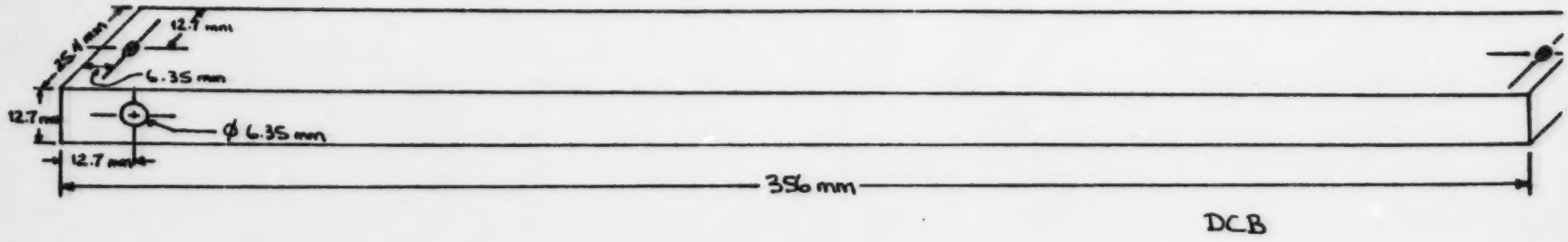


Figure 1 Dimensions d'un échantillon DCB

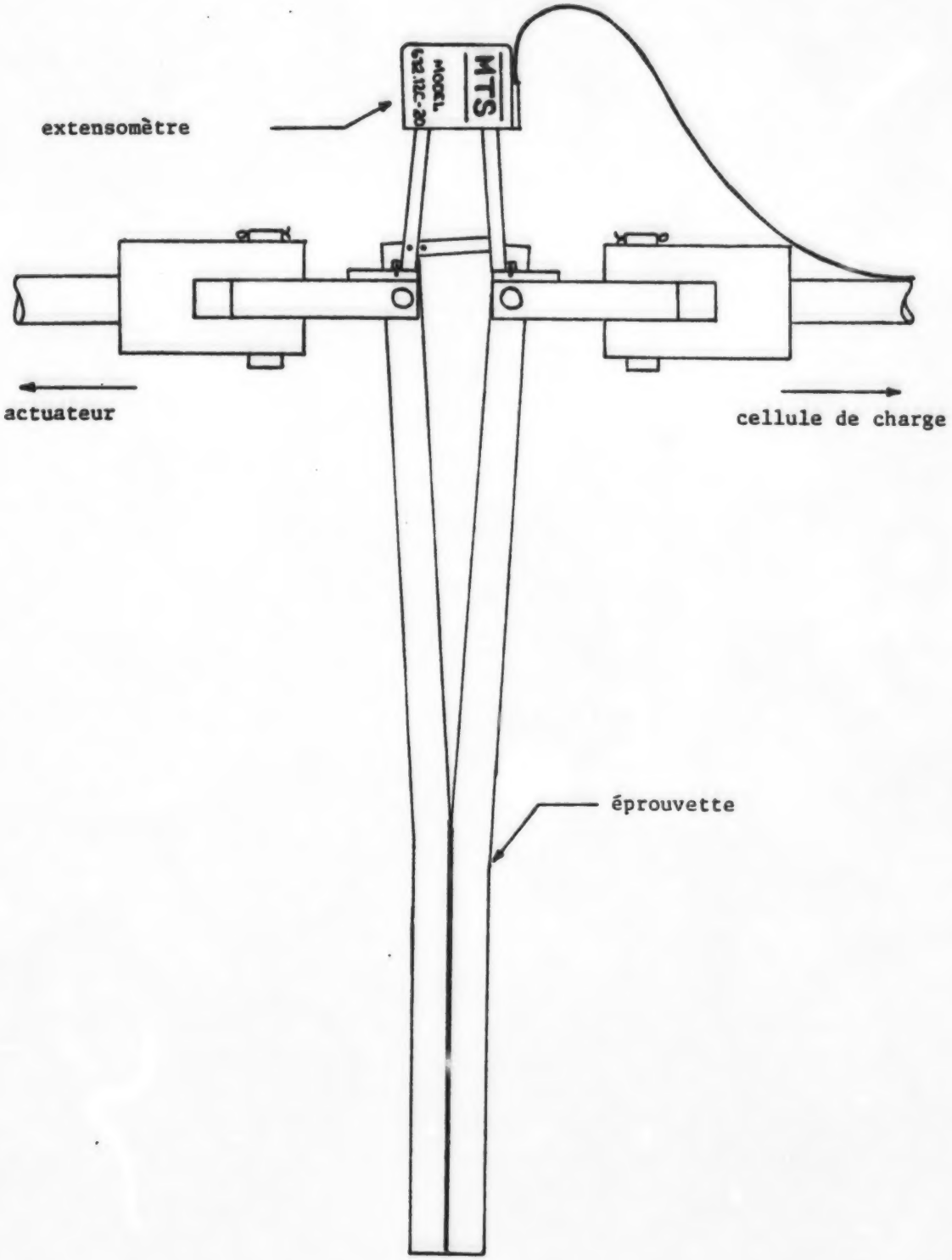


Figure 2 Schéma du montage d'essai

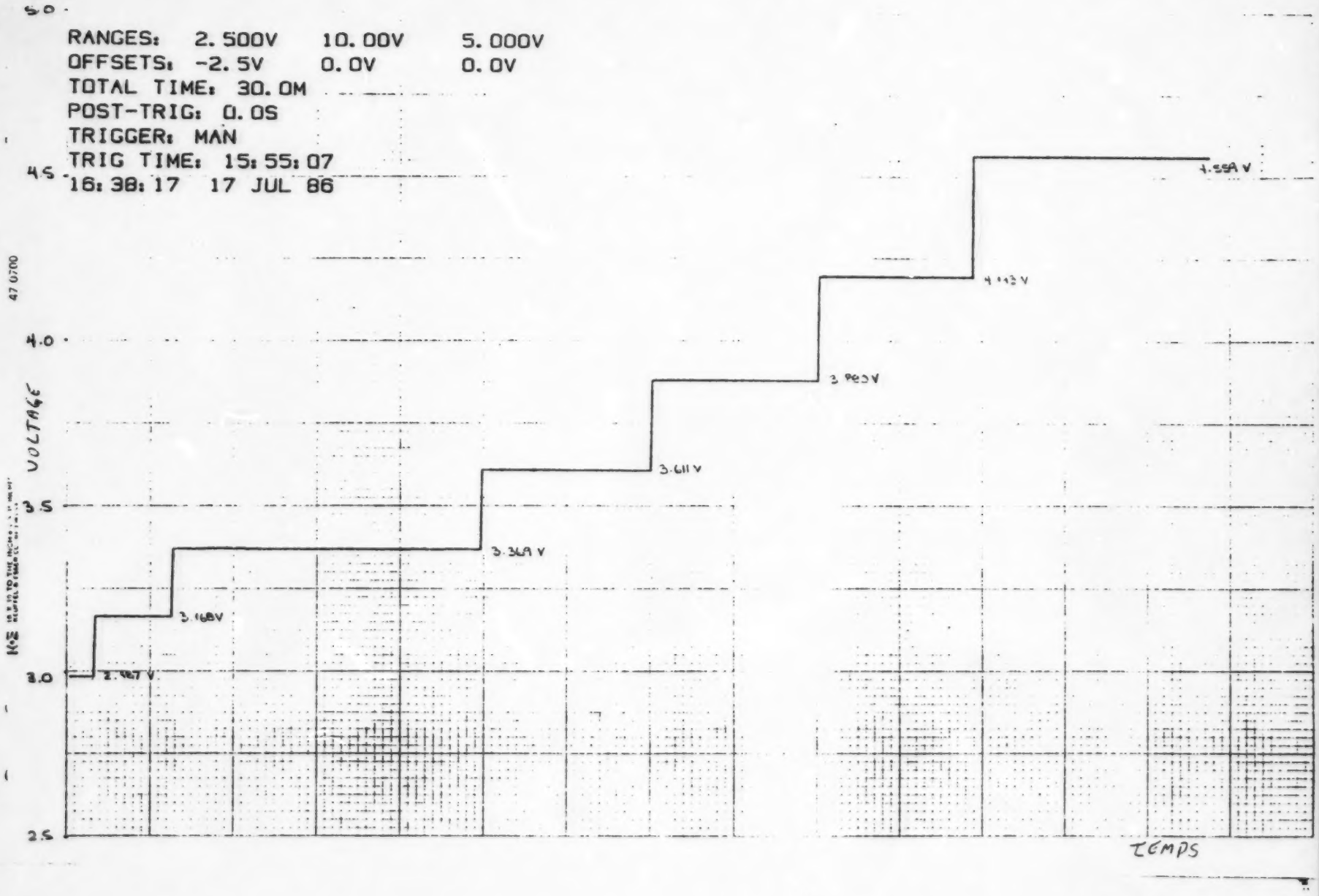


Figure 3 Courbe "voltage vs temps" d'un échantillon testé avec jauges

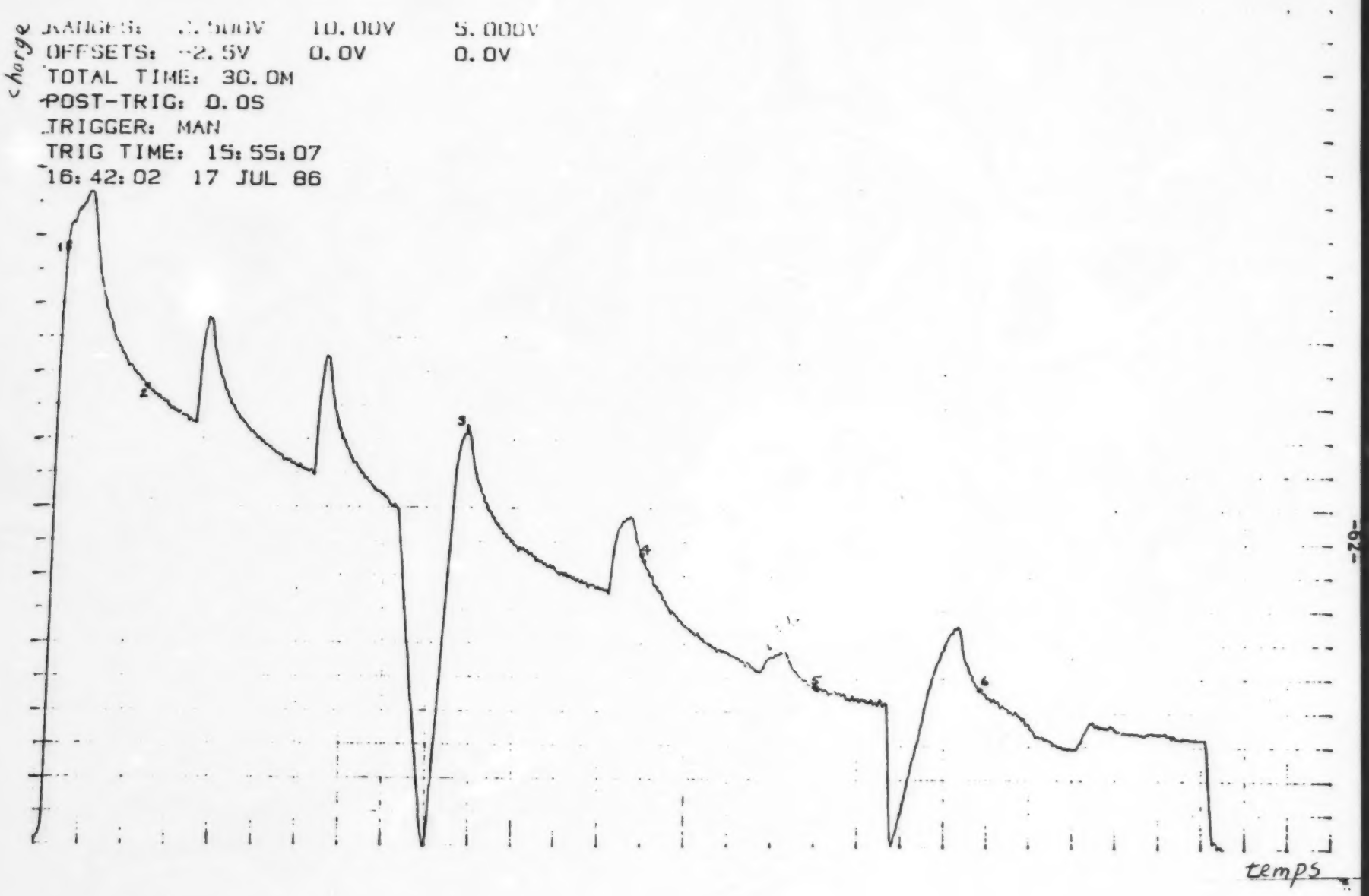


Figure 4 Courbe "charge vs temps" d'un échantillon testé avec jauges

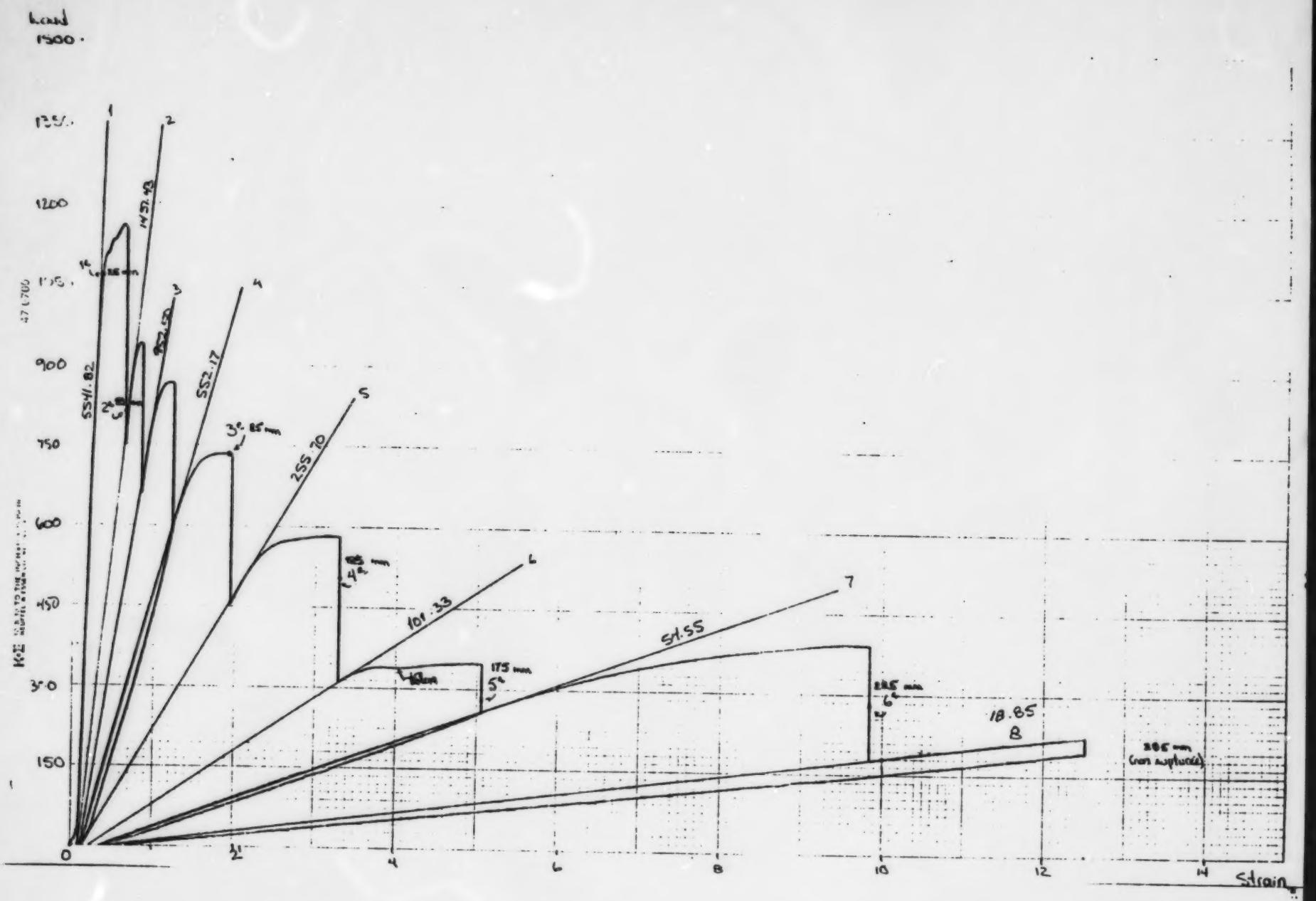
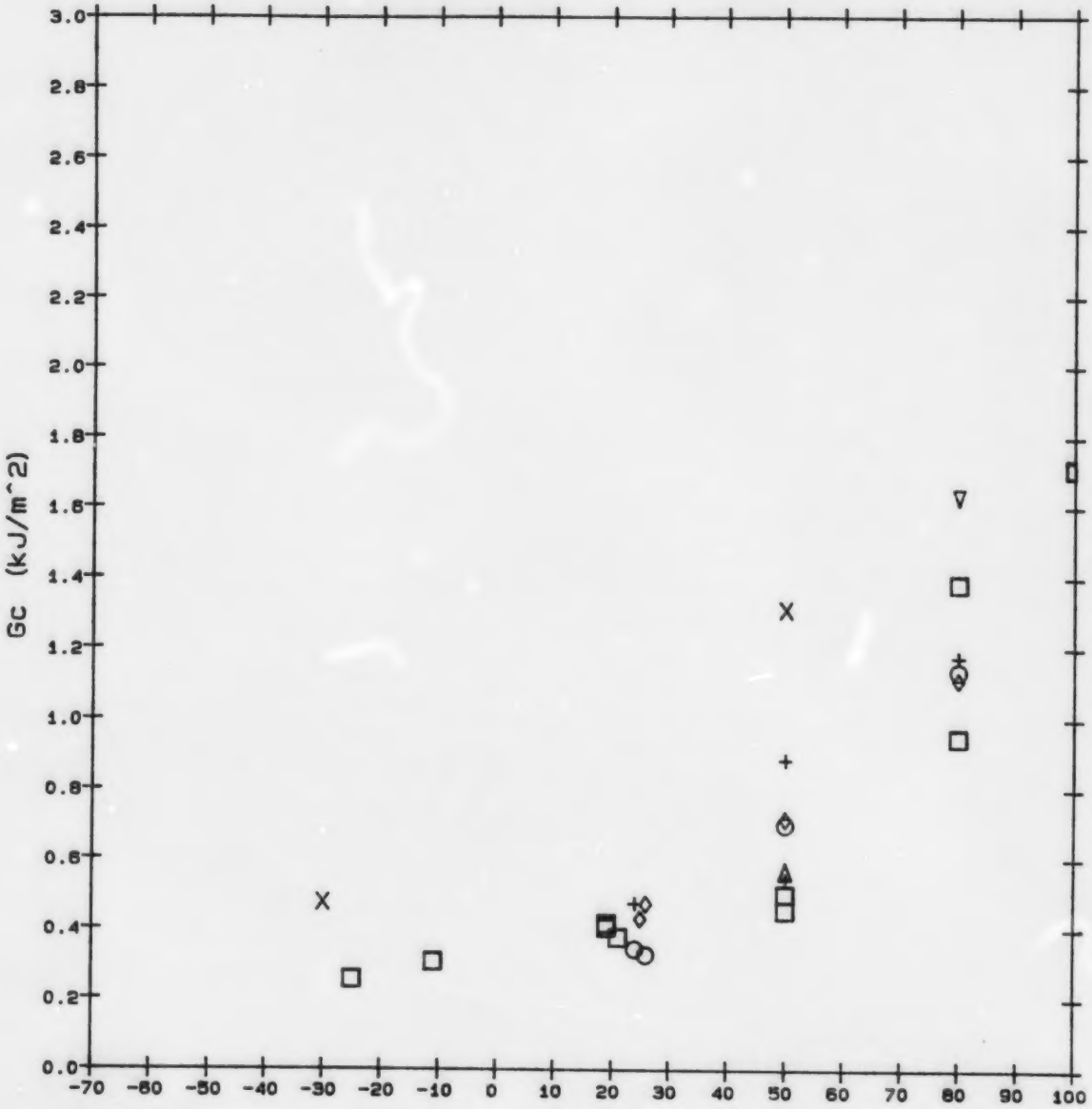


Figure 5 Courbe "charge vs déformation" d'un échantillon testé avec jauges

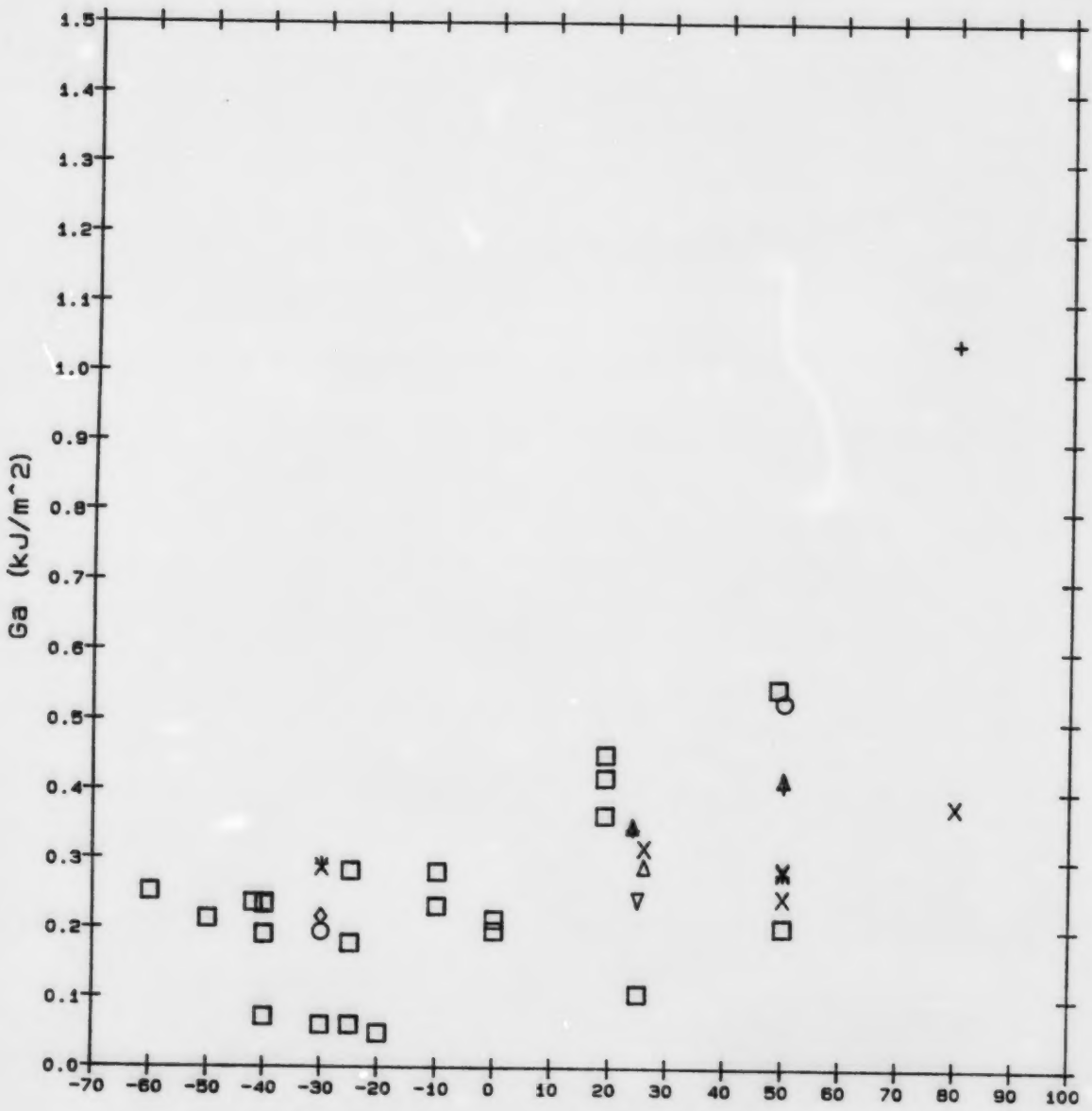
EFFET DE LA TEMPERATURE SUR Gc
POUR UNE RUPTURE ADHESIVE



○ 0.1 mm
□ 0.3 mm
△ 0.4 mm
◇ 0.5 mm
▽ 1.5 mm
X 2.3 mm
\+ 2.8 mm

Figure 7

EFFET DE LA TEMPERATURE SUR Ga
POUR UNE RUPTURE COHESIVE



○ 0.1 mm
□ 0.3 mm
△ 0.4 mm
◇ 1.0 mm
▽ 1.5 mm
X 2.3 mm
\+ 2.8 mm

Figure 8

EFFET DE LA TEMPERATURE SUR Ga
POUR UNE RUPTURE ADHESIVE

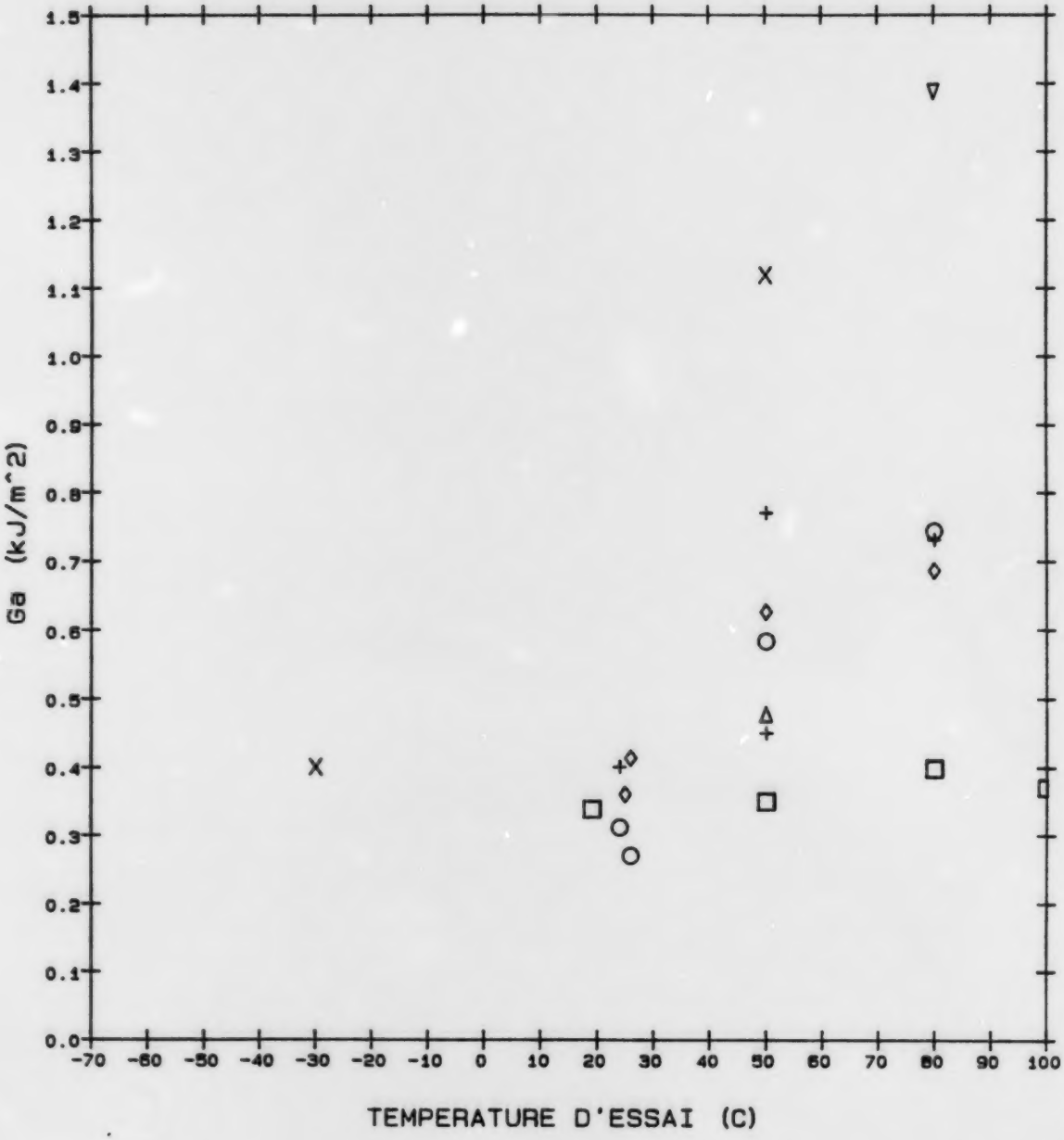


Figure 9

EFFET DE LA TEMPERATURE SUR Gc
POUR UNE RUPTURE COHESIVE

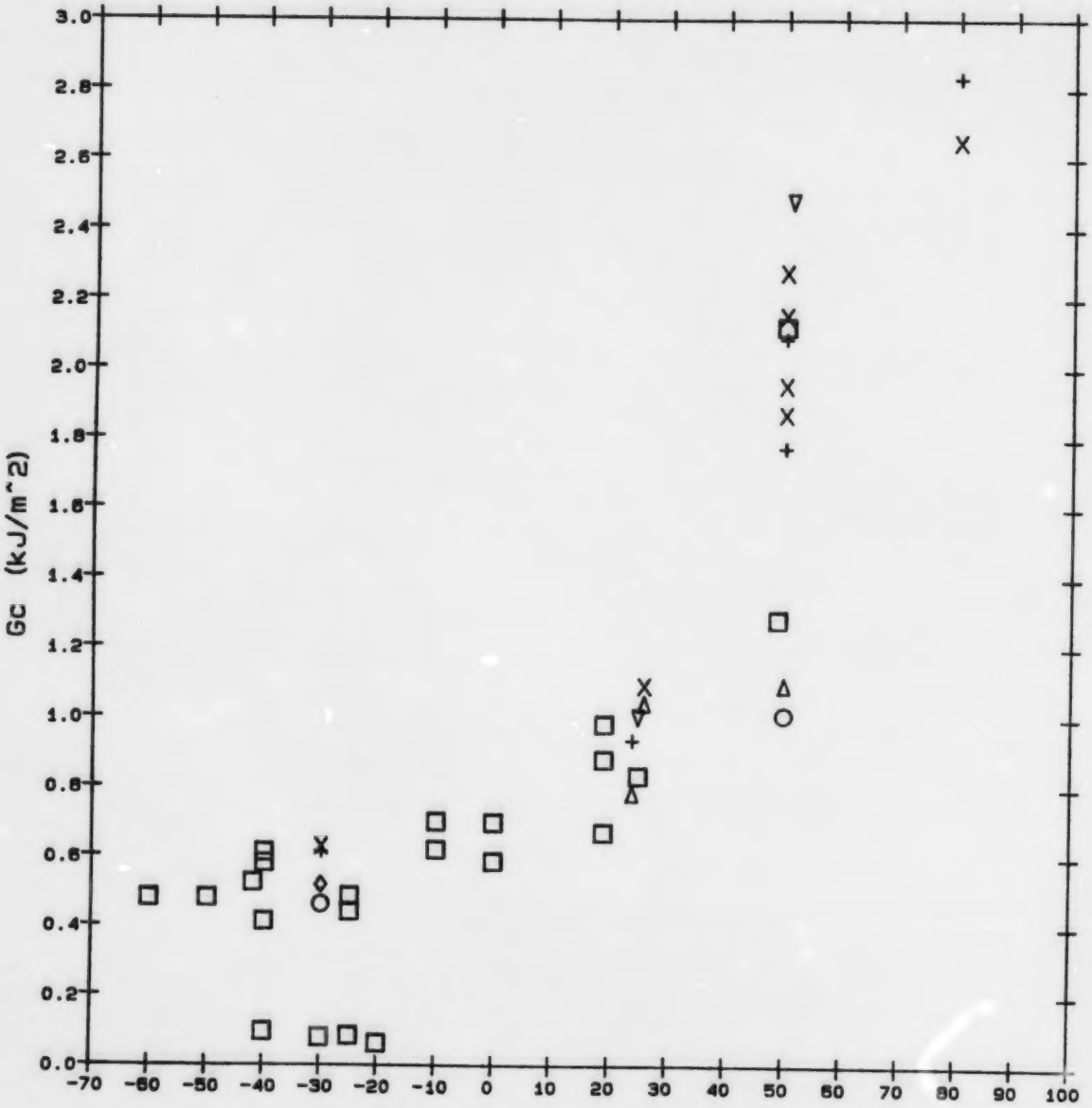
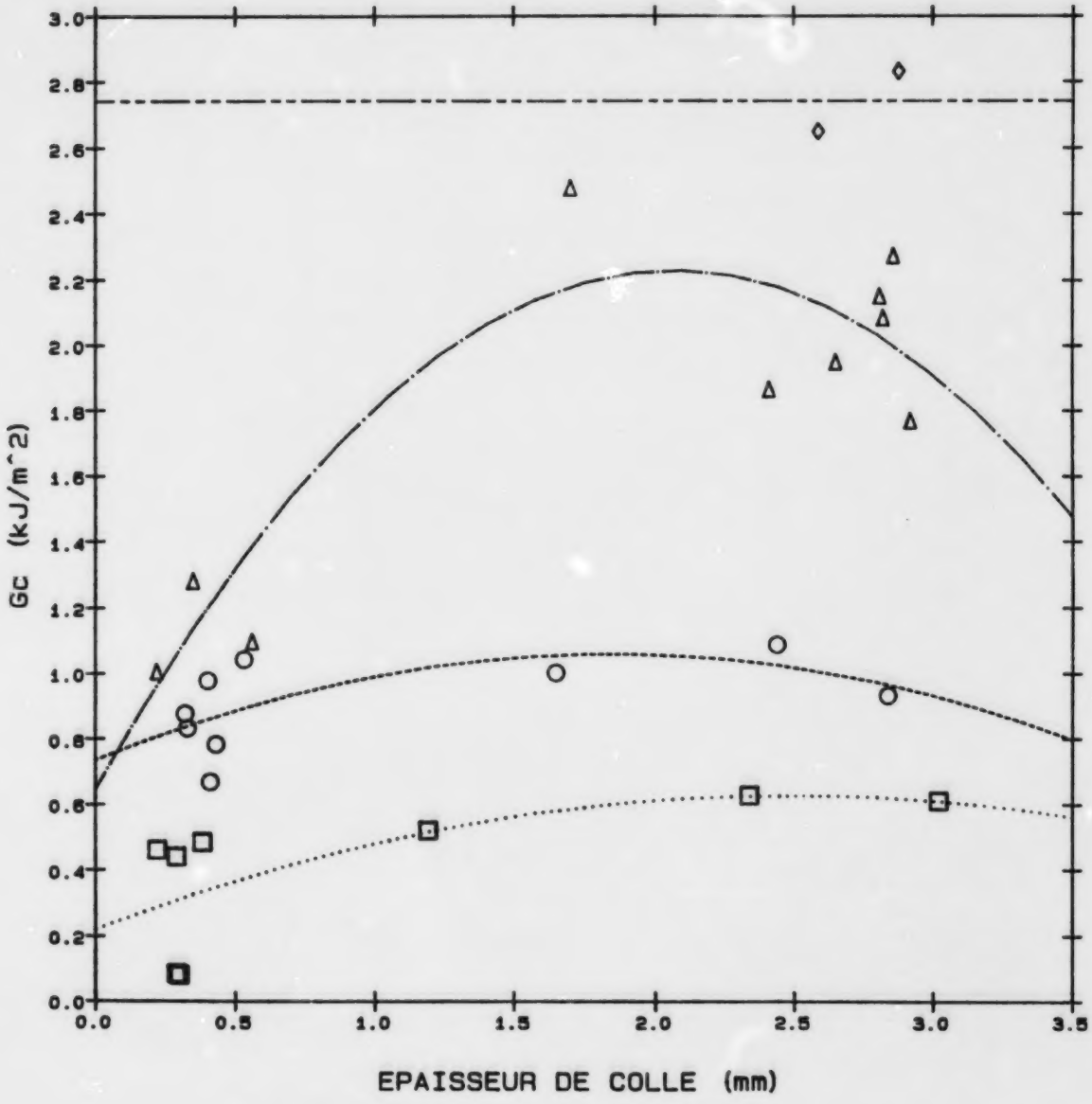


Figure 6

INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DU JOINT DE COLLE
SUR Gc POUR DIFFERENTES TEMPERATURES
ET POUR UNR RUPTURE COHESIVE



□ -30 C
○ 25 C
△ 50 C
◇ 80 C
..... APPROXIMATION DU 2ieme DEGRE DE -30 C
---------- APPROXIMATION DU 2ieme DEGRE DE 25 C
—·—·— APPROXIMATION DU 2ieme DEGRE DE 50 C
—·—·—·— APPROXIMATION PAR UNE CONSTANTE DE 80 C

Figure 10

INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DU JOINT DE COLLE
SUR Gc POUR DIFFERENTES TEMPERATURES
ET POUR UNE RUPTURE ADHESIVE

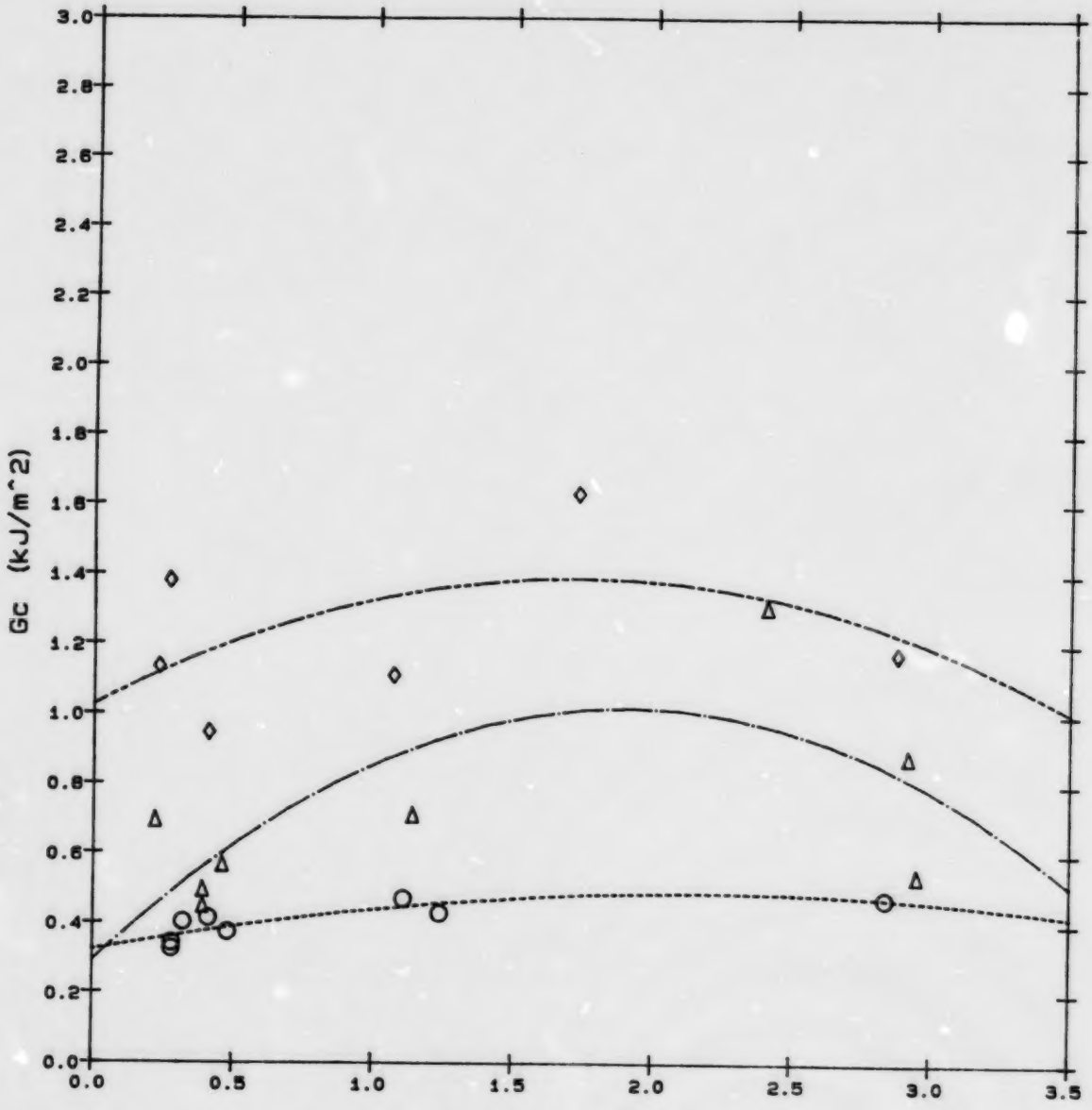


Figure 11

INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DU JOINT DE COLLE
SUR Ga POUR DIFFERENTES TEMPERATURES
ET POUR UNE RUPTURE COHESIVE

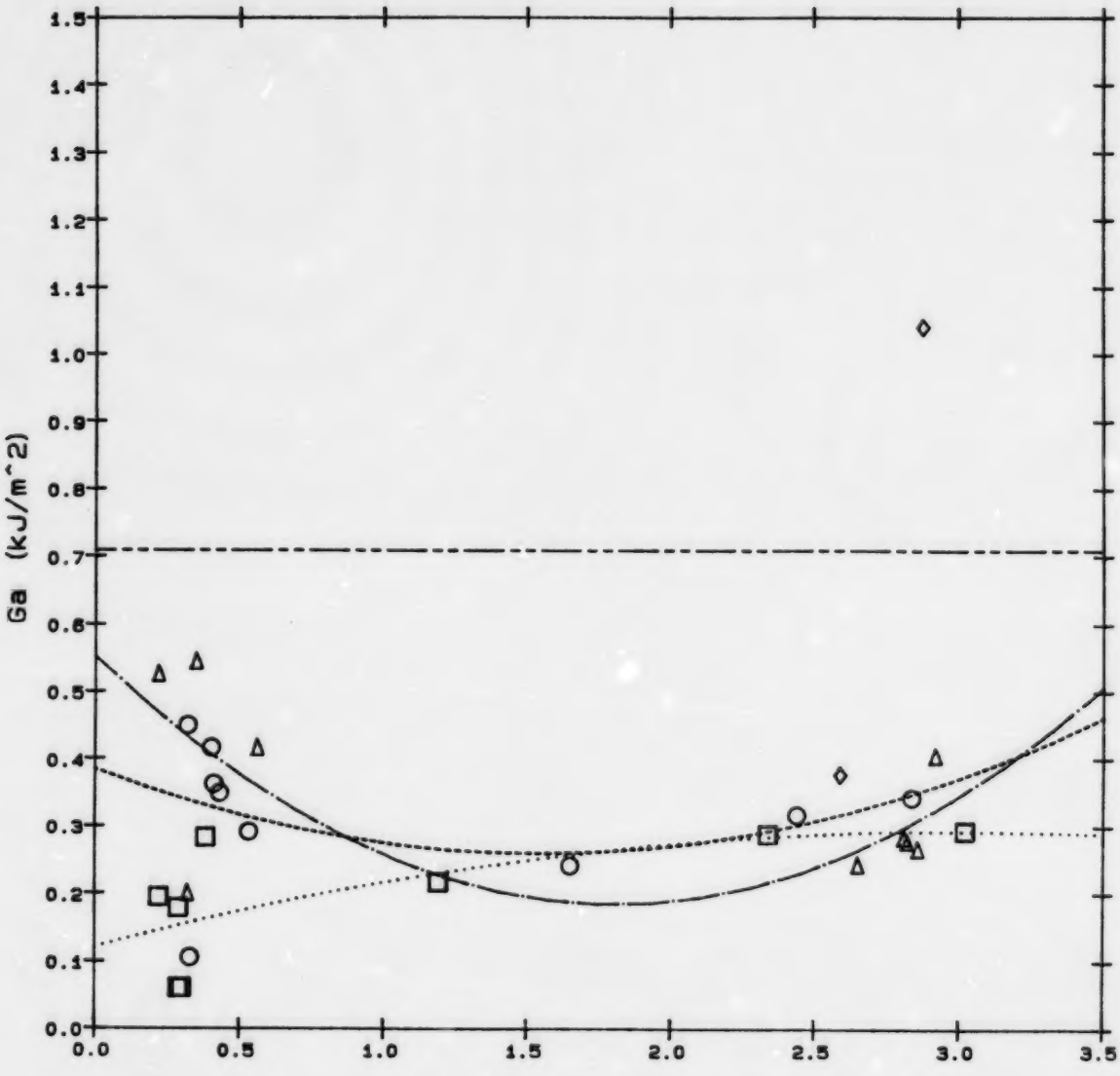


Figure 12

INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DU JOINT DE COLLE
SUR Ga POUR DIFFERENTES TEMPERATURES
ET POUR UNE RUPTURE ADHESIVE

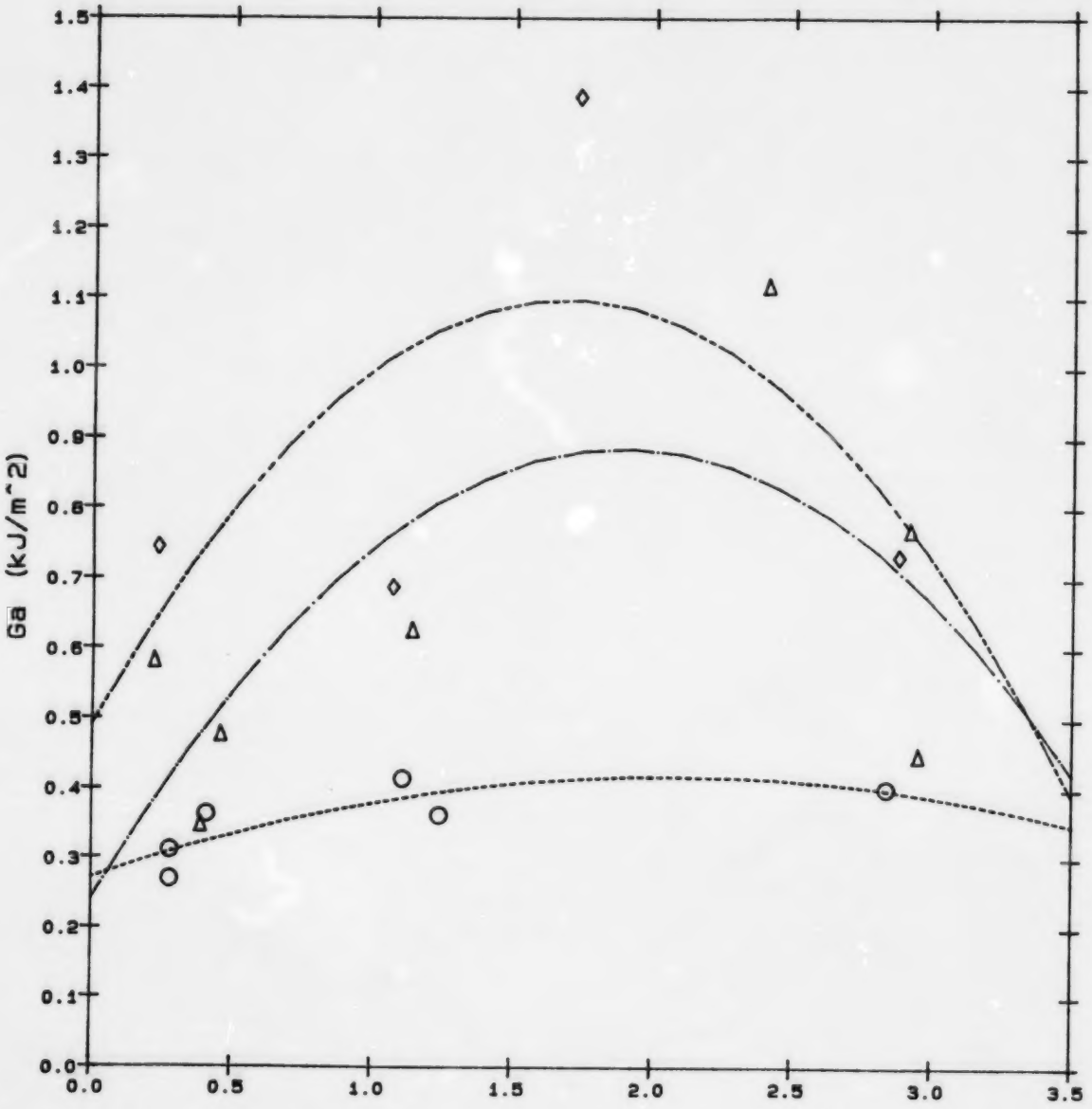


Figure 13

DIFFERENCE ENTRE ENERGIES DE RUPTURE ET D'ARRET
POUR DES RUPTURES COHESIVE ET ADHESIVE

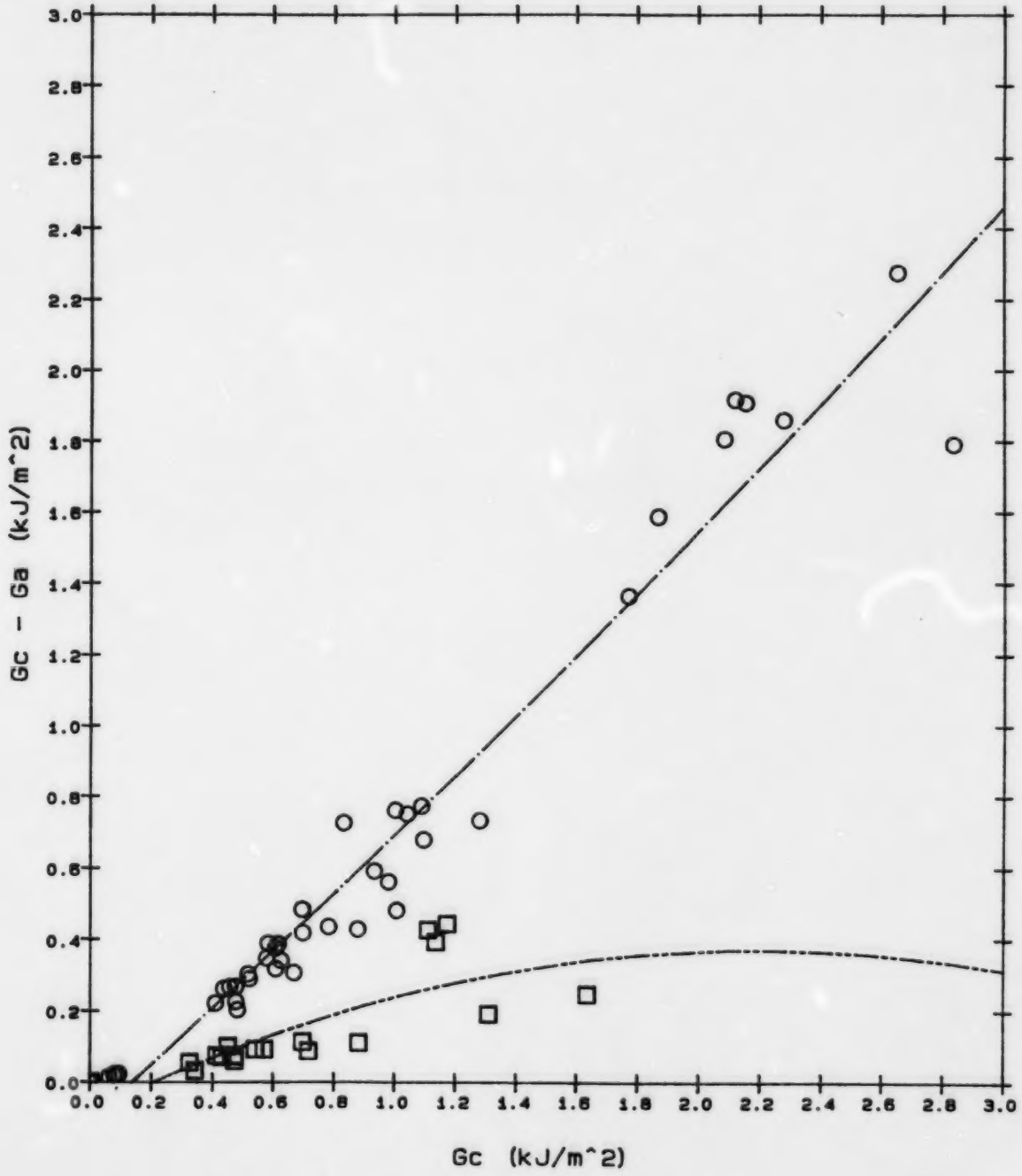
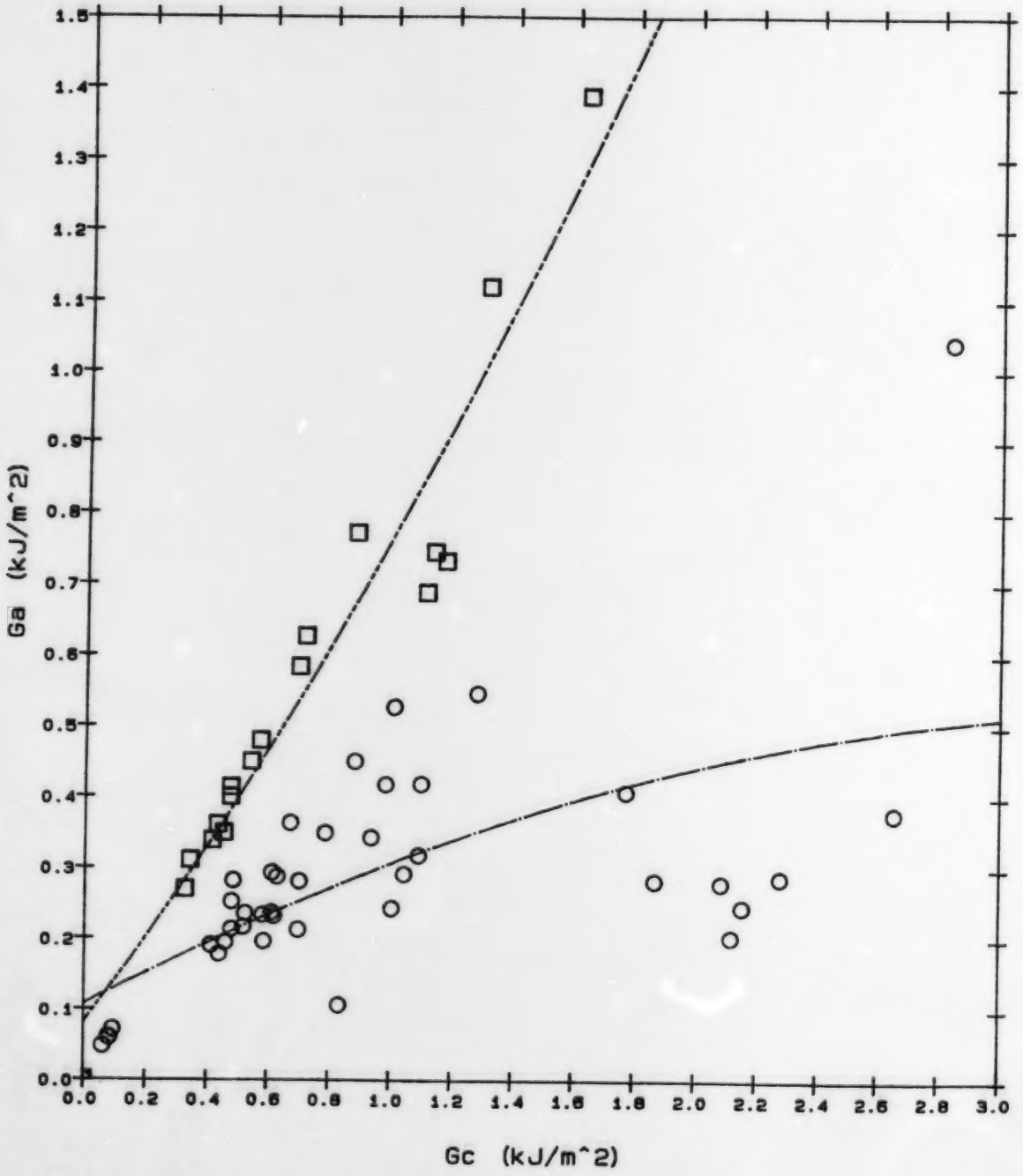


Figure 14

VARIATION DE L'ENERGIE D'ARRET EN FONCTION
DE L'ENERGIE DE RUPTURE



○ RUPTURE COHESIVE
□ RUPTURE ADHESIVE
——— APPROXIMATION DU 2ieme DEGRE DE COHESIF
- - - - - - APPROXIMATION DU 2ieme DEGRE DE ADHESIF

Figure 15